Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 71 (1980)

Heft: 9

Artikel: Aktuelle Transformatorenprobleme : Bericht über das Kolloquium zur Vorbereitung der CIGRE 1980, in Harrogate (GB), September 1979

Autor: Christen, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905251

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Aktuelle Transformatorenprobleme

Bericht über das Kolloquium zur Vorbereitung der CIGRE 1980, in Harrogate (GB), September 1979

1. Alternative dielektrische Prüfverfahren; Betriebserfahrungen

Das Thema umfasste einerseits die alternativen dielektrischen Prüfverfahren (induzierte Spannungsprobe, Normal- und Langwellenstoss gemäss IEC-Publikation 76, Teil 3) in Relation zum Isolationsniveau des Netzes, anderseits den Einfluss auf die Transformatorauslegung sowie eine Übersicht bezüglich der bisherigen Prüf- und Betriebserfahrungen. Letztmals wurde das Thema im Kolloquium 1973 besprochen; der Rapport 12–04 (1974) enthält eine Diskussions-Zusammenfassung einschliesslich Parameter-Betrachtungen im Hinblick auf Prüfniveau und Isolationskoordination. Das Kolloquium 1979 bemühte sich, bei diesem Themenkreis besonders aus den zwischenzeitlichen Erfahrungen verbindende Beziehungen zwischen den Prüfmethoden und den aufgetretenen Fehlern zu finden.

1.1 Fehlergeschichte

Von der Arbeitsgruppe WG 12–05 für die statistische Fehlererfassung liegen noch keine ausreichenden Resultate vor. Daher muss zurzeit auf der subjektiven Meinung einzelner Benutzer aufgebaut werden.

Fehler von Transformator-Kategorien, erste approximative Abschätzung: Höhere Systemspannungen (> 250 kV) verursachen keinen Anstieg der Isolationsfehlerquoten; dagegen ist eher ein Leistungseinfluss erkennbar. Geregelte Transformatoren, speziell ältere Autotransformatoren mit grossen Regelbereichen, zeigen verstärkte Fehlerraten.

Fehler durch stationäre und instationäre Spannungen: Sowohl bei betriebsfrequenten Verhältnissen als bei transienten Vorgängen ist es wesentlich, die «Primärursache» von den «sekundären Folgeerscheinungen» mittels einer genauen Fehleranalyse zu trennen. Statistische Vergleiche über die Häufigkeit der zwei Fehlerarten sind zurzeit nicht vorhanden. Jedoch konnte festgestellt werden, dass sich im ersten Betriebsjahr die meisten Defekte ereignen.

Fehlerorte: Die zahlreichsten Fehler treten im Stufenschalter samt Antrieb auf. Defekte bei Verbindungen, Anschlüssen und Schirmungen sind häufiger als Wicklungsschäden. Schutzeinrichtungen haben ebenfalls grössere Fehlerzahlen, dafür sind die Fehler aber nicht so gravierend.

1.2 Fehlermechanismus

Auch hier wurde zwischen den stationären Betriebsverhältnissen und den transienten Spannungsvorgängen mit verschiedenen Wellenformen unterschieden. Zwangsläufig treffen dabei die unterschiedlichen Meinungen der Erzeuger und Benutzer aufeinander, wieweit die Betriebsbedingungen bzw. -erfahrungen mit den simulierenden Werksprüfungen (speziell nach den neuen IEC-Vorschlägen) korrespondieren.

Spannungszusammenbrüche über lange Öldistanzen: Zunächst wurde mit einem Zeitrafferfilm der Spannungsdurchbruchs-Mechanismus zwischen Elektroden in Öl unter verschiedenen Bedingungen (Abstand, Feuchtigkeit, Isolier-Barrieren) demonstriert. Anschliessend wurden folgende Themen behandelt:

– Relation zwischen Stoss- und Wechselspannungsfestigkeit. Die Angaben über den sog. Stossfaktor schwankten im Bereich von 2...3, wenn man von einigen Grenzwerten absieht.

– Langzeittest mit 1,5facher Nennspannung über 30 min. oder mehr. Diese Prüfung simuliert die Betriebsverhältnisse bei länger dauernden Überspannungen am besten.

– Die Spannungsfestigkeit des Öles sinkt mit steigendem Volumen; ebenso haben Feuchtigkeit, Verunreinigungen und gelöste Gase Einfluss auf die Durchschlagsspannung.

– Das Verhältnis zwischen der Spannungsfestigkeit von Vollwellen und kurzzeitigen Wechselüberspannungen nach dem neuen IEC-Test liegt in keinem kritischen Bereich. Ganz allgemein ändern die IEC-Regeln die Transformatorauslegungen bezüglich ihrer Ölstrecken nicht.

Fehler in der festen Isolation: Hier ist zu unterscheiden zwischen direkten Stossdurchschlägen und Wechselspannungszusammenbrüchen mit vorangehender Teilentladung. Zu den Themen der langen Öldistanzen kamen noch zwei weitere Punkte: Die in IEC vorgeschlagenen Teilentladungswerte von 300...500 pC (oder 150 μV in den American IEEE Trial Standards) sowie der Zeiteinfluss zwischen Langwellen und normalen Vollwellen.

Kombinierte Isolation: Alle Barrierensysteme in Transformatoren bestehen praktisch aus solchen Isolationsanordnungen; dies gilt sowohl für die Wicklungen selbst als auch für alle Abstützungskonstruktionen einschliesslich jener der Verbindungsleitungen, Regelschalter und Durchführungen. Die Diskussion drehte sich um die bereits erwähnten Fragenkomplexe im Hinblick auf Isolationsbarrieren: Wechsel- und Stoßspannungsfestigkeit von Barrierensystemen, diesbezügliche Relation zwischen Langwellen und normalen Vollwellen, Studie von Teilentladungen bei Stossvorgängen. Zum letzten Punkt ist zu erwähnen, dass die oszillographische Fehlerfeststellung innerhalb der Wicklung zwar sehr sensibel ist, aber sich trotzdem immer wieder die Frage nach einer zusätzlichen Teilentladungserfassung zur weiteren Fehlereinengung erhebt.

1.3 Transiente Schwingungsprobleme in Wicklungen

Einleitend ging die Diskussion um die verschiedenen Wellenformen für transiente Vorgänge und die bestimmenden Parameter: Stirn und kapazitive Anfangsverteilung, Rücken und Schwingungsverhalten von Wicklungen einschliesslich Eigenfrequenzen.

Die heute üblichen Wellenformen bei der Prüfung auf transientes Spannungsverhalten bei SF_6 wurden auch im Hinblick auf die Gasschalter und gekapselten Ableiter bei SF_6-Anordnungen einer näheren Betrachtung unterzogen; es fand sich daraus jedoch keine Notwendigkeit für Ergänzungen. Bezüglich der Regulierwicklungs-Oszillationen in Verbindung mit abgeschnittenen Wellen wird bei den heutigen Isolations-Koordinierungen und Ableitern die abgeschnittene Welle allgemein nicht mehr zeitgemäss empfunden. Die Fehlerfeststellung mittels der nachfolgenden Vollwelle ist speziell in Regelwicklungen nicht absolut zuverlässig. In der USA-Tradition beträgt die Spannungshöhe der abgeschnittenen Welle 115 % des BIL, nach den heutigen IEC-Regeln sind nur mehr Vollwellen vorgesehen.

Transiente Schaltspannungen werden in einer USA-Arbeitsgruppe besonders im Hinblick auf Wicklungs-Resonanzprobleme eingehend studiert. Abschliessende Resultate liegen jedoch nicht vor.

1.4 Änderung des konventionellen Testprogrammes

Ausgehend von den Betriebserfahrungen in Verbindung mit der laufenden Fehlererfassung wurde einerseits die Notwendigkeit einer abgeschnittenen Welle und deren Wellenform besprochen. Wie bereits festgestellt, stehen die meisten Experten dieser Frage eher ablehnend gegenüber. Diskutiert wurde ferner die Frage nach neueren Erkenntnissen über zulässige Werte von Teilentladungen oder bessere Definitionen sowie das Problem der Langzeittests mit Teilentladungs-Überwachung und der tolerierbaren Hysteresis für kurzzeitige Spannungsspitzen.

Zusammenfassend gab es zwar keine bedeutenden Neuheiten; immerhin konnte mit Befriedigung festgestellt werden, dass in einem Land bisher mehr als 200 Transformatoren erfolgreich nach dem neuen Testprogramm geprüft worden sind.

2. Kurzschlussfestigkeit von Transformatoren

Wiederum in 4 Hauptabschnitten hat man sich bemüht, eine Vorgangsweise zur Sicherstellung der Kurzschlussfestigkeit zu finden.

2.1 Anforderungen

Sowohl in der IEC-Publikation 76 als auch in ANSI/IEEE-1978 gibt es eine einfache Basis hinsichtlich der Kurzschlussfestigkeit: Transformatoren sollen dynamisch und thermisch über 2 s kurzschlussfest sein. Vom Benutzer sind die verschiedenen System-Kurzschlussleistungen zu spezifizieren. Der Hersteller hat dann eine Informationsverpflichtung, wenn die spezifizierten Werte nicht realisierbar sind, so dass ein gemeinsamer Kompromiss gefunden werden kann. Spezielle Anforderungen müssen einvernehmlich geregelt werden.

Mit Ausnahme der USA wurden die Fehlerquoten durch Kurzschlüsse relativ gering angegeben; dynamische Defekte sind häufiger als thermische. In den USA steht weiterhin die festgelegte Kurzschlussdauer von 2 s in Diskussion.

2.2 Auslegungspraktiken

Von der Working Group 12–04 wurden anhand zahlreicher Beispiele die verschiedenen statischen Kurzschlusskraft-Computerprogramme untereinander verglichen; der Schlussbericht wurde Ende 1979 in «Electra» veröffentlicht. Da sich die grössten Abweichungen im Rahmen von ± 10 % bewegen, können die betrachteten Methoden als annähernd gleichwertig angesehen werden. Von einer Erweiterung der Aufgabenstellung auf dynamische Kurzschlusskräfte sowie Materialbeanspruchungen wurde Abstand genommen, weil dies in ein unübersehbares Labyrinth von konstruktiven und technologischen Fragen hineinführen würde.

Zum heiklen Thema Modellteste kann man für die Majorität folgende Kurzfassung geben: Modelle sind wertvolle Konstruktionshilfen des Herstellers, sie stellen aber kein repräsentatives Fundament für den Benutzer dar.

2.3 Fabrikationsmethoden

Von wesentlicher Bedeutung sind hier Materialkontrollen (geometrisch und technologisch), Wicklungsherstellung (Dimensionen und Amperewindungsverteilung), Wicklungspräparation (Vorpressung und Stabilisation), Endkontrolle von Kern und Wicklungen (Relative Position, Endpressung, Trocknung, Ölimprägnation). Entsprechende Qualitätskontrollen sind im Hinblick auf einen kontinuierlichen Kurzschluss-Sicherheitsgrad unerlässlich. Der Wicklungsstabilisierung und -pressung ist dabei ganz besonderes Augenmerk zu schenken.

2.4 Kurzschlussprüfungen

Kurzschlussprüfungen kompletter Transformatoren sind teuer (20...30 % des Transformatorpreises), und ausserdem gibt es nur sehr wenige leistungsstarke Prüfinstitute. Die Feststellung geringer Vorschädigungen oder Deformationen ist nicht so einfach. Sehr grosse Einheiten können kaum zufriedenstellend geprüft werden. Die Prüfung selbst soll mit dem maximalen Stosskurzschlußstrom in der ungünstigsten Position erfolgen. Weiter ist die Anzahl der Kurzschlüsse, ihre Dauer, die Schaltung sowie der Versuchsablauf genau zu definieren («pre-set» bzw. «post-set», je nachdem, ob der Kurzschluss vor oder nach Anlegen der Spannung geschaltet wird).

Nach ANSI umfasst die Diagnostik Strom- und Spannungsoszillogramme, Impedanzänderung (< 2 % bei Brückengenauigkeit 0,1 %), Erregerstrom sowie Stossimpulse mit niedriger Spannung (Oszillogrammvergleich); die Nachkontrollen visuelle Kontrollen und eine dielektrische Prüfung (mit 100 % U_P nach U.S.Standards).

In früheren Jahren gab es bis zu 33 % Ausfälle, in letzter Zeit aber sehr wenige; dies zeigt deutlich eine positive Entwicklungsrichtung auch auf diesem Gebiet.

3. Transformator der Zukunft

Bereits an der Cigré 1978 wurde prognostiziert, dass bis zum Jahr 2000 die Transformatorleistungen auf 2400 MVA und die Netzspannungen auf 1200 kV steigen werden (zurzeit ist sogar eine Probeleitung mit 1600 kV im Versuchsbetrieb). Einige Experten sind allerdings der Meinung, dass die Leistungssteigerung (wenn überhaupt) sehr langsam vor sich gehen wird, da man der Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit den Vorrang einräumen muss. Mit Rücksicht auf Feuerfolgeschäden von Blocktransformatoren kommt vielleicht ein Leistungsschalter in die Verbindungsschienen zum Generator hin, aber jedenfalls ist eine weitere Verbesserung der Entregung anzustreben, eventuell auch Transformatoren mit Gasisolation anstelle von Öl. Die Qualitätskontrolle und Kurzschlussfestigkeit werden noch mehr in den Vordergrund rücken, ebenso wie weitere Verlust- und Geräuschreduktionen. Supraleitungs-Anwendung im Transformatorenbau ist nach wie vor problematisch, dagegen scheint Flüssiggaskühlung mehr Zukunft zu haben (ähnlich Maschinen und Kabel).

Tabelle I

Ausfallzeit	400-kV-Autotransformatoren	130-kV-Regeltransformatoren
≦ 1h	50 %	30 %
1–24 h	42 %	36 %
14 h–1 Woche	5 %	21 %
1 Woche–1 Monat	3 %	7 %
> 1 Monat	0 %	6 %

4. Berichte der «Working Groups» (WG)

WG 12–03: Isolationskoordination und zukünftige Prüfverfahren

Die Arbeitsgruppe befasst sich mit zwei prinzipiellen Problemen: den statistischen Methoden der Stossprüfung (Bericht Electra-Nr. 55/Dezember 1977) sowie mit dem Ersatz der bisherigen, induzierten Spannungsprüfung durch einen Langzeittest bei Überwachung der Teilentladung (TE). Darüber wird voraussichtlich 1980 der Endbericht in Electra erscheinen (TE-Einsatz-Wahrscheinlichkeit anhand von Prüfmustern). In Japan wurden über drei Jahre ähnliche Versuche durchgeführt, wobei auch der Alterungseinfluss mitberücksichtigt worden ist.

WG 12–05 Zuverlässigkeit der Transformatoren

Zurzeit fehlen noch die Angaben aus den USA. Die weltweite Fehlerstatistik wird in Electra gegen Ende 1980 als Abschlussbericht veröffentlicht werden. Bis jetzt lässt sich folgender Vorkommentar abgeben:

Die bisherige Auswertung umfasste zwei Netzspannungsbereiche: 100...300 kV (ca. 2000 Einheiten) sowie 300...750 kV (ca. 600 Einheiten). Ferner wurde unterteilt nach Voll- und Autotransformatoren sowie ohne und mit Regelung. Die Fehlereinteilung erfolgt in fünf Kategorien: Haupt- und Leiterisolation, magnetischer Kreis, Verbindungen mit Durchführungen, Öl, Kessel und Kühlsystem sowie Stufenschalter.

Von Interesse ist ferner die Abhängigkeit der Fehlerwahrscheinlichkeit von der Einsatzzeit (besondere Studiengruppe für «Reliability-Coordination»). Eine Untersuchung in Schweden für 400 kV über 370 Transformatorjahre sowie 130 kV über 2200 Transformatorjahre ergab die Fehlerquoten nach Tabelle I (in %):

Kurzzeitausfälle sind oft auf Versagen von Hilfsgeräten zurückzuführen und daher nicht sehr repräsentativ.

WG 12–06 Spezialprobleme sehr grosser Transformatoren

Ein Erwärmungsversuch mit Gasanalyse beim Hersteller soll als Zusatzversuch bei folgenden Einheiten vorgenommen werden: ab 500 MVA (dreiphasig) bzw. 167 MVA (einphasig), bei kleineren Dreiphasentransformatoren dann, wenn die Kurzschlußspannung > 20 % ist und bei Drehstromeinheiten mit grossem Überlastbereich (eventuell bereits ab 300 MVA). Die Versuchsdurchführung erfolgt nach den dielektrischen Tests, Standzeit 3...5 Tage, Position für maximalen Strom, Mindestzeitdauer 12 h (bei Überlast gemäss Spezifikation); die Öltemperatur ist anfangs rasch hochzutreiben, die Ölpumpen sind 2 h vor und nach dem Versuch laufen zu lassen. Ölprobenentnahme: 2 h vor Einschalten der Pumpen, bei Versuchsbeginn, dann alle 4 h, beim Ausschalten sowie 2 h nach Abstellen der Pumpen. Die Gasanalyse ist so bald als möglich im gleichen Labor mit identischer Methode und von derselben Person auszuführen. Normale Ausgangswerte sind 1...2 %; Detailvorschläge werden in Zusammenarbeit mit Studienkomitee 15 ausgearbeitet. Eine Gasgehalt-

Zunahme von 1:2 ist gut; 1:3 ist meist akzeptabel nach Überprüfung; bei einer Gasgehalt-Zunahme > 4 ist eine genauere Untersuchung nötig. Wird der Transformator im letzten Fall nach gemeinsamer Vereinbarung dennoch in Betrieb genommen, muss er laufend mittels Gasanalyse überwacht werden.

Über den Nutzen ausgedehnter Leerlaufversuche, Minimum 24 h, sind die Meinungen sehr geteilt.

Die zulässige Erwärmung von massiven Eisenteilen kann unter bestimmten Voraussetzungen bis 135 °C betragen.

Bezüglich Übererregung werden Empfehlungen für 1,4 U_{Nenn} während 5 s ausgearbeitet.

Zum Test selbst wäre zu ergänzen, dass ein Kurzschlusslauf natürlich nicht so betriebsnahe ist wie die sog. Gegenschaltung: selten durchführbar, da zwei Transformatoren unter bestimmten Voraussetzungen benötigt werden; ausserdem ist der Energiebedarf wesentlich grösser und übersteigt dadurch oft die vorhandenen Möglichkeiten.

Der Abschlussbericht soll 1981 erscheinen.

A. Christen, SEV, und *J. Kreuzer,* Sécheron

Bodo Julius Heinrich von Borries 1905–1956

Deutsches Museum München

Das Auflösungsvermögen eines Lichtmikroskopes ist begrenzt durch die Wellenlänge des Lichtes und liegt bei einigen Hundert Nanometern. Will man in die Dimensionen von Molekülen oder gar Atomen vordringen, nicht nur Bakterien, sondern auch Viren beobachten, müssen andere Wege eingeschlagen werden; Röntgenstrahlen brächten wegen ihrer kleineren Wellenlänge einen gewissen Gewinn, doch sind keine Materialien bekannt, aus denen Linsen hergestellt werden könnten.

Bei Arbeiten mit Kathodenstrahloszillographen zeigte sich anfangs der Dreissigerjahre die Möglichkeit, den Elektronenstrahl zum Mikroskopieren zu verwenden. Bodo von Borries hat zusammen mit einigen Mitarbeitern, darunter vor allem *E. Ruska,* diese Arbeiten geleitet, bis das brauchbare Elektronenmikroskop serienmässig fabriziert werden konnte.

Bodo von Borries, Sohn eines Landrates, wurde am 22. Mai 1905 in Herford (Westfalen) geboren, studierte an den Technischen Hochschulen von Karlsruhe, Danzig und München und wurde wissenschaftlicher Assistent von Prof. *A. Matthias* am Hochspannungsinstitut der TH Berlin. Dort promovierte er 1930, und von da an widmete er sich fast ausschliesslich der Elektronenmikroskop-Forschung. Da aber zu jener Zeit nur wenige Physiker an die Realisierung eines solchen Gerätes glaubten, fehlte es an Geld, bis Siemens 1936 den Forschern Arbeitsplätze einräumte.

Schon Ende 1939 verliess das erste Elektronenmikroskop, bei dem elektrische Felder die Funktion von Linsen besorgten, das Werk. Von den Schwierigkeiten, die es dabei zu meistern galt, erhält man eine Vorstellung, wenn man weiss, dass es dabei notwendig war, Spannungen von einigen 10^4 V auf $\pm$ 2 V genau zu regulieren!

Später gelang eine wesentliche Vereinfachung und Verbesserung, indem anstelle eines elektrischen Feldes ein Magnetfeld mit Permanentmagneten zur Anwendung kam.

Noch zu Lebzeiten von Borries baute man zwei Arten von Elektronenmikroskopen, solche für Durchstrahlung von Objekten und andere für Rückstrahlung, letztere vor allem für Oberflächenbeobachtungen. Werkstoffkunde, Biologie und Medizin erhielten im Elektronenmikroskop ein wertvolles Instrument, dessen Auflösungsvermögen bei etwa 0,5 nm liegt. Die Vergrösserung ist etwa 100mal stärker als beim Lichtmikroskop, nämlich mehrere 100000fach.

Bevor von Borries bei Siemens arbeiten konnte, war er 1933...1936 als wissenschaftlicher Ingenieur bei der Hauptverwaltung der Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerke in Essen tätig. Mit einer Arbeit über die Empfindlichkeit der photographischen Platte für Elektronen habilitierte er 1945 an der TH Berlin. In dieser Zeit schrieb er das Buch «Übermikroskopie», das 1949 herauskam. 1953 folgte er einer Berufung als ordentlicher Professor für Elektronenoptik und Feinmechanik an die TH Aachen. Er gründete 1949 die deutsche und 1954 die Internationale Gesellschaft für Elektronenmikroskopie, deren Präsident er war.

Nur wenig über 51 Jahre alt, starb von Borries nach einer Operation, seine Frau mit fünf Kindern hinterlassend. Er war ein begeisterter Forscher mit einer ausgesprochenen Vorliebe fürs Konstruieren.

H. Wüger